

# Herausgeber

**Prof. Dr. H.-P. Beck**

Institut für Elektrische Energietechnik  
beck@iee.tu-clausthal.de

**Prof. Dr. U. Bracht**

Institut für Maschinelle Anlagentechnik und Betriebsfestigkeit  
bracht@imab.tu-clausthal.de

**Prof. Dr. J. Dix**

Institut für Informatik  
dix@informatik.tu-clausthal.de

**Prof. Dr. B. Hammer**

Institut für Informatik  
hammer@informatik.tu-clausthal.de

**Prof. Dr. K. Hormann**

Institut für Informatik  
hormann@informatik.tu-clausthal.de

**Prof. Dr. U. Konigorski**

Institut für Elektrische Informationstechnik  
koni@iei.tu-clausthal.de

**Dr. G. Lange**

Rechenzentrum  
lange@rz.tu-clausthal.de

**Prof. Dr. N. Müller**

Institut für Maschinenwesen  
mueller@imw.tu-clausthal.de

**Prof. Dr. H. Richter**

Institut für Informatik  
richter@informatik.tu-clausthal.de

**Prof. Dr. Ch. Siemers**

Institut für Informatik  
siemers@informatik.tu-clausthal.de

**Dr.-Ing. Ch. Vetter**

Institut für Prozess- und Produktionsleittechnik  
vetter@ipp.tu-clausthal.de

**Prof. Dr. M. Vossiek**

Institut für Elektrische Informationstechnik  
vossiek@iei.tu-clausthal.de

**Managing Editor:** Dipl.-Inf. Alexander Hasenfuß

## Editorial

Informationstechnik bildet die Basis systemtechnischer Innovationen in Industrie, Wirtschaft und Wissenschaft, aber auch in fast allen anderen Bereichen des öffentlichen und privaten Lebens. Um die hierfür erforderlichen vielfältigen Informationstechnologien in Lehre und Forschung bedarfsgerecht zu integrieren, haben sich Wissenschaftler der technischen Universität Clausthal über Fakultätsgrenzen hinweg zum *Informationstechnischen Zentrum* zusammengeschlossen.

Durch enge Zusammenarbeit des Informationstechnischen Zentrums mit den natur- und ingenieurwissenschaftlichen Instituten stellt die TU Clausthal der Industrie das heute so notwendige fächerübergreifende Expertenwissen für die Erarbeitung komplexer, prozessintegrierter Systemlösungen in einem weit gefächerten Gebiet zur Verfügung.

Ziel der Berichte des Informationstechnischen Zentrums (*ITZ Berichte*) ist es, Beiträge über wissenschaftliche Forschungsergebnisse und Entwicklungen vornehmlich aus Instituten der TU Clausthal aus Bereichen wie formale Systeme der Informatik, wissensbasierte Systeme, Bildverarbeitung und -analyse, Mehrrechnersysteme, Computer Aided Engineering, Mess- und Automatisierungstechnik, Elektrotechnik, Prozessleittechnik zu veröffentlichen und damit einer breiteren Öffentlichkeit zugänglich zu machen. Insbesondere sind dies

- Forschungsarbeiten und Berichte über Projekte, Entwicklungen, Fallstudien,
- eingeladene Beiträge von außerhalb,
- Tagungs- und Workshopberichte,
- Dissertationen.

Bei der Veröffentlichung von Beiträgen wird auf ein zeitaufwendiges Referentensystem weitgehend verzichtet, um Forschungsergebnisse mit minimaler Verzögerung und dementsprechend hoher Aktualität herausbringen zu können.

Die Herausgeber

# **Demonstration der Bewegungsparallaxe in "Virtuellen Räumen"**

Prof. Dr.-Ing. Peter F. Elzer

Dipl.-Inf. Krzysztof Gorgolewski

Dipl.-Ing. Karl-Heinz Sauermann

Institut für Prozess- und Produktionsleittechnik, Technische Universität Clausthal  
Julius-Albert-Straße 6, 38678 Clausthal-Zellerfeld  
elzer@ipp.tu-clausthal.de

Der vorliegende Beitrag basiert im Wesentlichen auf einer Diplomarbeit zum Thema "Demonstration der Bewegungsparallaxe in virtuellen Räumen" [1]. Diese Arbeit wurde am Institut für Prozess- und Produktionsleittechnik (IPP) der Technischen Universität Clausthal (TUC) im Rahmen von Untersuchungen zum Themenkreis "Orientierung in virtuellen Räumen" durchgeführt. Zunächst wird eine theoretische Beschreibung der Bewegungsparallaxe gegeben, die eine Tiefenwahrnehmung ohne beidäugiges Sehen ermöglicht. Zusätzlich werden weitere Tiefenhinweise durch optische Information besprochen. Abgerundet wird der theoretische Teil durch Betrachtungen über den Begriff der "Immersion". Dann wird die Realisierung der dargestellten Phänomene beschrieben, die mit Hilfe der im Virtual Reality Labor des IPP verfügbaren Hard- und Software durchgeführt wurde. Den Abschluß bildet eine Diskussion der erreichten Ergebnisse. Es konnte gezeigt werden, dass durch geeignete Mittel ein räumlicher Eindruck auch ohne die Verwendung der medizinisch und ergonomisch nicht unumstrittenen Stereobrillen erzeugt werden kann.

## **1 Einleitung**

In den letzten Jahren ist eine zunehmende Entwicklung und Verbreitung von Virtual Reality in Forschung, Entwicklung und Entertainment zu beobachten. Ein wichtiges Problemgebiet ist dabei die Orientierung in virtuellen Räumen, für die wiederum die räumliche Wahrnehmung eine wesentliche - wenn auch nicht die einzige - Voraussetzung ist.

Eine der Grundlagen dieser Wahrnehmung ist das beidäugige Sehen (Stereoskopie), wie z.B. bei Schmidtke [2] und Frisby [3] dargelegt wird. Es ist aber nicht notwendigerweise allein maßgeblich dafür. Verliert beispielsweise eine Person die Sehkraft eines ihrer Augen, so büßt sie erfahrungsgemäß nicht völlig die Fähigkeit zu räumlicher Wahrnehmung ein. Wie in den Abschnitten 2.2 und 2.3 näher dargelegt, tragen dazu nämlich noch mindestens zwei weitere Aspekte bei:

- die Bewegungsparallaxe und
- bildliche Tiefenhinweise aus der naturgegebenen Lebensumwelt der Menschen.

Ausgelöst durch die ergonomischen Probleme von Stereobrillen und die Überlegungen von Smets [4] wurden am IPP deshalb seit einer Reihe von Jahren Untersuchungen dahingehend durchgeführt, wie in virtuellen Umgebungen ein räumlicher Eindruck hervorgerufen werden kann, ohne auf beidäugiges Sehen zurückgreifen zu müssen. Sie begannen mit dem Einsatz der Prinzipien von Gibson [5], um die Navigation in völlig abstrakten Räumen (z.B. einem Textkorporus, Abbildung 1.1) zu erleichtern [6, 7, 8], oder den Zustand technischer Systeme (z.B. eines Kraftwerks, Abbildung 1.2) [9, 10, 11] dadurch schneller und sicherer zu erkennen, dass abstrakte Größen - auf einem zweidimensionalen Bildschirm - so dargestellt werden, dass beim Betrachter intuitiv der Eindruck einer räumlichen Umgebung entsteht.

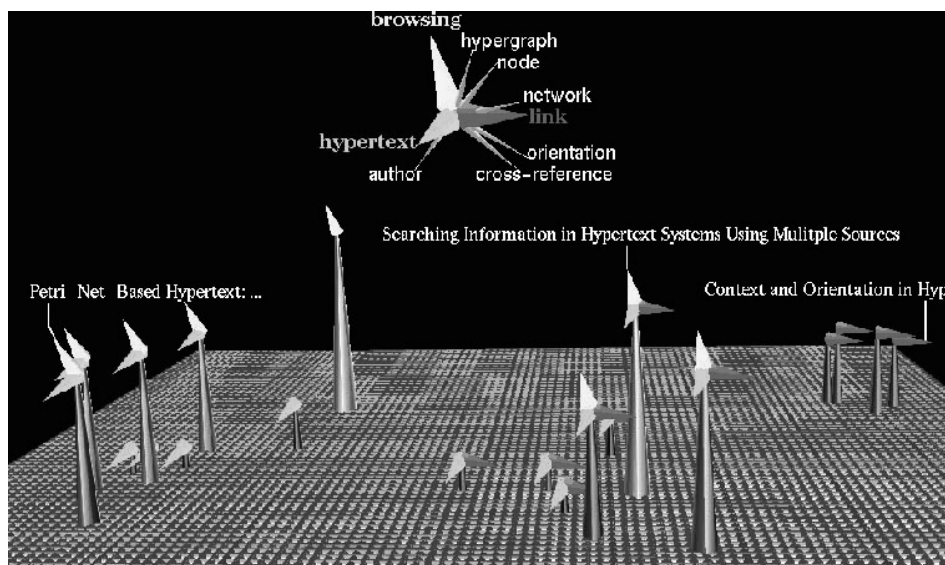


Abb. 1.1: Navigation in abstrakten Räumen

Weitere sehr interessante Anwendungen stellen Entwurf und virtuelle Montage von Maschinenteilen sowie Teleoperation von Handhabungsautomaten dar. In beiden Fällen ermöglicht der Verzicht auf Stereobrillen ein wesentlich angenehmeres und ermüdungsärmeres Arbeiten, was für die Akzeptanz der entsprechenden Techniken in der industriellen Praxis von großer Bedeutung ist.

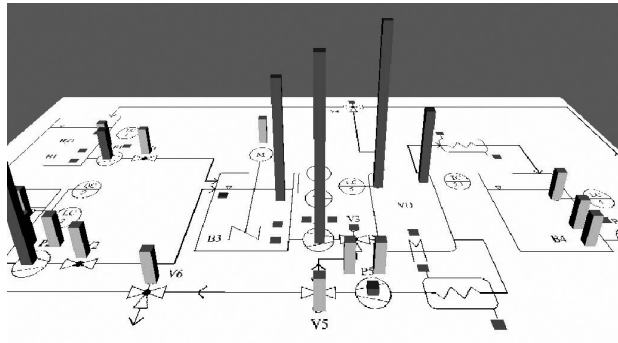


Abb. 1.2: Räumliche Darstellung des Zustandes eines technischen Systems

Am IPP wurde deshalb im Rahmen einer Studienarbeit ein CAD-Arbeitsplatz realisiert, bei dem durch einen Positionssensor die Blickrichtung eines Betrachters und seine Entfernung vom Bildschirm erkannt werden (Abbildung 1.3). Die dargestellten Objekte werden dementsprechend gedreht, vergrößert oder verkleinert [12, 13]. Inzwischen wurde dieses Verfahren ergänzt und dazu benutzt, eine fernsteuerbare Kamera durch die Kopfbewegungen des Betrachters am Bildschirm zu steuern. Dadurch entsteht ein sehr intensiver Eindruck von "Telepräsenz" [14].



Abb 1.3: CAD Arbeitsplatz mit Positionssensor

Sehr erfolgreich war auch der Versuch, einen fernsteuerbaren Handhabungsautomaten in Australien von der TUC aus zu bedienen. Durch die Anwendung der Prinzipien von Gibson war es möglich, mit einer Kamera und einem zweidimensionalen Bildschirm auszukommen [15, 16, 17] und trotzdem eine sehr hohe Präzision zu erreichen.

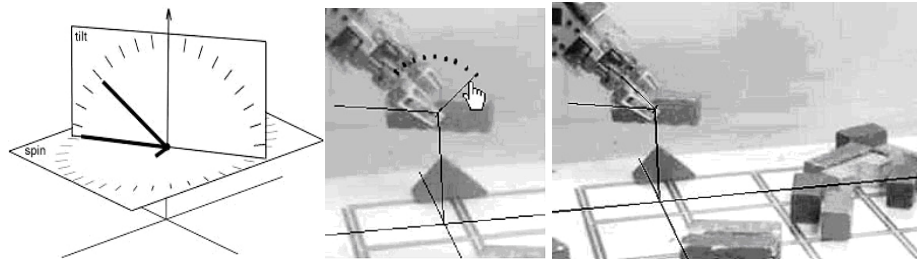


Abb. 1.4: Fernsteuerung eines Handhabungsautomaten

Es stand also nur noch aus, die Wirksamkeit der Bewegungsparallaxe und anderer Tiefenhinweise in großen virtuellen Räumen zu erproben, um auch bei Aufgaben der Bau- oder Fabrikplanung ohne Stereobrillen auskommen zu können. Dies war der Gegenstand der diesem Beitrag zu Grunde liegenden Arbeit.

Mit der schon an anderer Stelle [18] geschilderten Ausrüstung des Virtual Reality Labors des Instituts für Prozess- und Produktionsleittechnik der Technischen Universität Clausthal ist ohne weiteres eine interaktive virtuelle Umgebung in einer Größe realisierbar, die beim Benutzer den Eindruck erweckt, selbst im dargestellten Raum anwesend zu sein. Die Art der Projektion der virtuellen Umgebung entspricht dabei dem monokularen Sehen. Um eine möglichst natürliche Wirkung einer virtuellen Umgebung zu erzielen, müssen jedoch noch eine Reihe theoretischer Grundlagen und gestalterischer Regeln berücksichtigt werden. Dies gilt sowohl für ihre Darstellung, als auch für ihr Verhalten bei der Interaktion eines Benutzers mit der virtuellen Umgebung.

Von besonderer Bedeutung ist in diesem Zusammenhang der Begriff der "Immersion". Er sagt im Prinzip aus, daß ein System der virtuellen Realität so konzipiert sein sollte, dass ein Benutzer bei der Interaktion damit das Gefühl bekommt, direkt und natürlich mit der virtuellen Umgebung zu interagieren. Es besteht eine Verbindung zwischen der Qualität der Darbietung der virtuellen Realität und dem Grad der Immersion. In Bezug auf die dabei zu berücksichtigenden gestalterischen Regeln kann der Entwerfer jedoch auf einen reichen Erfahrungsschatz zurückgreifen.

Virtuelle Realität bzw. virtuelle Kunst gibt es nämlich bereits seit langer Zeit. So untersucht beispielsweise Grau [19] Freskenräume der Gotik, Deckenpanoramen in Barockkirchen oder das 1789 patentierte "Diorama". All diese Kunstwerke versuchen, den visuellen Sinn eines Menschen komplett zu adressieren und somit ein Gefühl der Immersion aufzu-

bauen. Einige der dabei berücksichtigten Faktoren befassen sich mit Tiefenhinweisen, die das räumliche Sehen unterstützen.

Zu Beginn der Arbeit werden also aus theoretischer Sicht einige Eigenschaften der menschlichen Sinne, die Bewegungsparallaxe, weitere Tiefenhinweise, gefolgt von einer kurzen Einführung in die Theorie Gibsons [5], behandelt. Eine Erläuterung des Begriffs der Immersion schließt den theoretischen Teil ab. Nach einem Überblick über die vorhandene Hard- und Software des Virtual Reality Labors des Instituts für Prozess- und Produktionsleittechnik folgen die Beschreibung des benutzten Modells und eine Erläuterung des gewählten Lösungsansatzes. Abschließend wird die erarbeitete Lösung diskutiert und eine Bewertung aufgetretener Probleme vorgenommen.

## **2 Grundlagen**

In diesem Kapitel werden die wichtigsten Grundlagen wiedergegeben, die zum Verständnis der für den Zweck dieser Arbeit relevanten menschlichen Sinne, von Tiefenhinweisen, sowie der Bewegungsparallaxe und der Immersion nötig sind.

### **2.1 Die menschlichen Sinne**

Der Mensch erhält die notwendigen Informationen über die Außenwelt und den eigenen Körper mit Hilfe der Sinne. Dazu sind Empfangsorgane notwendig, sogenannte Rezeptoren, auf die Reize einwirken. Schmidtke [2] und Johannsen [20] behandeln die jeweiligen Sinne sehr ausführlich und anschaulich. Die physikalische Natur eines Reizes kann sehr verschieden sein, wie z.B. Licht, Schall, Druck, Temperatur, Beschleunigung, chemisch aktive Stoffe, um nur die wichtigsten zu nennen. Die Reizintensität muss oberhalb einer Reizschwelle und unterhalb der Schmerzschwelle des entsprechenden Rezeptors liegen. Ein Reiz ruft in den Rezeptoren Veränderungen hervor, die Erregung genannt werden. An sie schließt sich Empfindung an. Für alle Sinnesorgane gilt somit die Abfolge:

Reiz → Erregung → Empfindung

Die wichtigsten Sinnes- und Wahrnehmungsorgane des Menschen sind in Tabelle 2.1 überblicksmäßig zusammengestellt. Ihre Eigenschaften sind z.B. in [21] detailliert beschrieben.

Über den jeweiligen Beitrag der einzelnen Sinne zur menschlichen Informationsaufnahme finden sich in der Literatur voneinander abweichende Angaben. Im Mittel kann man aber davon ausgehen, daß über den Gesichtssinn etwa 80 und über den Gehörsinn etwa 10 Prozent der gesamten Informationsaufnahme erfolgen. Die verbleibenden 10 Prozent

verteilen sich ungefähr gleichmäßig auf die anderen Sinne. Auge und Ohr sind also die wichtigsten Sinnesorgan für die Informationsübertragungsprozesse zwischen Umwelt und Mensch und werden deshalb im Folgenden etwas ausführlicher beschrieben.

Wahrnehmungssystem:	Sinnesorgan:
visuell (Gesichtssinn)	Augen
auditiv (Gehörsinn)	Ohren
haptisch (Tastsinn)	Haut
olfaktorisch (Geruchssinn)	Nase
vestibulär (Gleichgewichtssinn)	Vestibularorgan

Tabelle 2.1: Wahrnehmungssysteme und Sinnesorgane eines Menschen

### 2.1.1 Das visuelle System

Das visuelle System empfängt das von einer Lichtquelle ausgesandte oder von einem Gegenstand reflektierte Licht mit dem Auge als Empfangsorgan und stellt die Information im visuellen Cortex des Gehirns dar. Für weitere Informationen wird auf die entsprechende Fachliteratur (z.B. Schmidtke [2]) verwiesen.

In der Praxis wird unterschieden zwischen "Gesichtsfeld" und "Blickfeld". Unter Gesichtsfeld versteht man den mit fixiertem Kopf und Auge übersehbaren Bereich, während das Blickfeld der Bereich ist, der durch ein bewegtes Auge bei fixiertem Kopf erfasst werden kann.



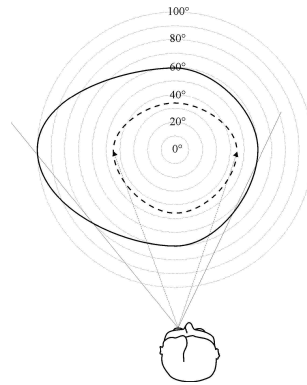


Abbildung 2.1: Das Gesichts- und Blickfeld des linken Auges eines Menschen

In Abbildung 2.1 sind das Gesichts- und Blickfeld des linken Auges einer Person skizziert. Das Gesichtsfeld wird durch eine gestrichelte Ellipse repräsentiert, das Blickfeld durch eine durchgezogene Ellipse.

Unter der Sehschärfe versteht man die Fähigkeit des Auges, zwei Punkte als getrennt wahrzunehmen. Das Auflösungsvermögen des Auges liegt in diesem Fall etwa bei einer Bogensekunde.

Bei der Erklärung des Tiefeneindrucks geht man meist davon aus, daß von einem räumlich ausgedehnten Gegenstand auf den Netzhäuten beider Augen zwei flächenhafte, aber unterschiedliche, Bilder entstehen. Die verschiedenen Impulsmuster, die sich aus den Bildverschiedenheiten ergeben, werden zentral zu einem räumlichen Eindruck zusammengesetzt. Der Tiefeneindruck wächst mit dem Augenabstand, nimmt aber mit der Betrachtungsentfernung ab. Hilfsmittel für eine monokulare Tiefenwahrnehmung sind neben der Bewegungsparallaxe die scheinbare Gegenstandsgröße, die perspektivische Verkürzung, der Licht- und Schattenwurf sowie farbliche Unterschiede.

### 2.1.2 Das auditive System

Beim auditiven System werden Schallschwingungen über das Ohr aufgenommen. In Mensch-Maschine-Systemen wird das auditive System des Menschen im wesentlichen durch den Einsatz von akustischen Warnanzeigen angesprochen [20]. Weiterhin können Geräusche emuliert werden, um Menschen in Simulatoren oder bei der Überwachung und Steuerung einen realistischeren Eindruck des dargestellten technischen Systems zu vermitteln. Im letztgenannten Zusammenhang spricht man auch von "Earcons" [22], ein Begriff, der in Anlehnung an die bei der bildlichen Darstellung abstrakter Zusammenhänge meist verwendeten "Icons" geprägt wurde.

## 2.2 Was ist Bewegungsparallaxe?

Der im Folgenden auftretende Begriff "monokular" bedeutet, dass ein Beobachter nur mit einem Auge visuelle Reize aufnimmt. Für die Benutzung beider Augen sagt man "binokular". Nach Regan [23] beschrieb Helmholtz schon vor über 100 Jahren eine Waldszene, in der er sich selbst befand. Helmholtz hatte ein Auge geschlossen, stand still und sah nur eine Fläche von grünen Blättern, die nicht in einzelne Objekte in unterschiedlichen Tiefen differenziert werden konnte. Dann bewegte er sich und bemerkte zwei Effekte:

- 1) eine plötzliche gleichzeitige Abtrennung einzelner Bäume und Büsche und
- 2) einen sprunghaften Übergang vom flächenhaften Bild in die anschauliche Tiefe.

Helmholtz interpretierte diese Effekte im Sinne von Bewegungsparallaxe, welche durch seine Kopfbewegungen erzeugt wurden. Somit kann Bewegungsparallaxe nach Gibson [5] und Faubert [24] wie folgt beschrieben werden: für einen bewegten Beobachter wird die ihn umgebende visuelle Szene als ein dahintreibendes Bild auf der Retina seiner Augen repräsentiert. Die Driftgeschwindigkeit auf der Retina ist vom relativen Abstand der gesehenen Objekte im Bild abhängig. Wenn ein Objekt näher am Beobachter ist, ist auch die Driftgeschwindigkeit dieses Objektes auf der Retina höher als wenn es weiter entfernt ist. Diese relative Bewegung des visuellen Bildes auf der Retina wird vom visuellen System eines Menschen zur Generierung eines Tiefengefühls benutzt. Eine weitergehende Deutung dieses Phänomens als allgemeines Hilfsmittel von Lebewesen für ihre Orientierung im Raum stammt ebenfalls von Gibson [5], der dazu den Begriff des "optischen Feldes" ("optical flow") eingeführt hat. In Abschnitt 2.3 wird darauf näher eingegangen.

Abbildung 2.2 illustriert, wie unterschiedliche Abstände von Objekten in einer visuellen Szene mit den korrespondierenden Punkten der Lichtstrahlen verschiedene Driftgeschwindigkeiten auf der Retina erzeugen. Punkt A ist weiter vom Auge entfernt als Punkt B. Ursprünglich sei ihre Abbildung auf der Netzhaut der gleiche Punkt: c. Wird das Auge (z.B. von links nach rechts) bewegt, trennt sich die Abbildung auf der Retina in die Punkte a und b. Während der Bewegung werden diese aufgrund der Geometrie gegeneinander verschoben. Das Ergebnis ist ein längerer Weg auf der Retina für die Projektion Bb als für Aa. Es wird also ein Unterschied in der Driftgeschwindigkeit gesehen. Dabei ist es gleichgültig, ob sich die visuelle Szene bewegt und das Auge stationär ist, oder sich das Auge bewegt und die Szene fest ist, z.B. beim Blick aus dem Fenster eines fahrenden Zuges. Die unterschiedlichen Abstände zwischen den beiden Punkten A und B entsprechen den verschiedenen wahrgenommenen Geschwindigkeiten, wenn beide Strahlen AC und BC sich mit verschiedenen Abständen zueinander in der gleichen Zeitspanne bewegen.

Die Bewegungsparallaxe ist also ein Hilfsmittel, ein monokularer Tiefenhinweis, wobei durch Kopfbewegungen senkrecht zur Blickachse eine Tiefenwahrnehmung entsteht. Mit der Bewegungsparallaxe können relative Abstände zwischen Objekten gut beurteilt werden.

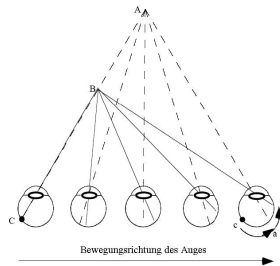


Abbildung 2.2: Bewegungsparallaxe erzeugt durch zwei Punkte in der Tiefe

### 2.2.1 Weitere Tiefenhinweise

Neben der Bewegungsparallaxe gibt es weitere bildhafte, monokulare Tiefenhinweise [ 5]. Ihre zweidimensionalen Informationen werden vom visuellen System als dreidimensional interpretiert. Die wesentlichsten dieser bildlichen Tiefenhinweise sind:

- Überlagerung/Verdeckung,
- Texturgradient,
- lineare Perspektive,
- Schatten und Schattierung,
- Helligkeit.

Sie werden in den nachfolgenden Absätzen etwas näher erläutert.

Aufgrund der Art der Interpretation dieser Tiefeninformationen im visuellen System des Menschen können sie aber auch mehrdeutig aufgefasst werden. Insbesondere wird versucht, bei Mehrdeutigkeiten bezüglich der Umwelt eines wahrgenommenen Bildes dieses in eine eindeutige Umwelt zu transformieren. Die Wahrnehmung ist also stark von der Verarbeitung im visuellen System und vom Kontext der Wahrnehmung abhängig. Dies wird als der Hauptgrund für die Entstehung von "optischen Täuschungen" angesehen.

Das aus der allgemeinen Literatur bekannte Vexierbild der "alten und der jungen Frau" ist ein gutes Beispiel dafür [25]. Zwei leicht verschiedene Versionen dieses Bildes sind in

Abbildung 2.3 wiedergegeben. Man beachte, daß der Übergang von einer Sichtweise zur anderen sprunghaft erfolgt und manchmal sogar willentlich herbeigeführt werden kann.



Abbildung: 2.3: Vexierbild

#### 2.2.1.1 Überlagerung und Verdeckung

Überlagerung und Verdeckung beschreiben die Lage von mindestens zwei Objekten in einem Bild. Wenn die Abbildung eines Objektes eine zweite Abbildung eines anderen Objektes teilweise abdeckt, dann erscheint es dem Betrachter so, als ob das verdeckte Objekt sich im Hintergrund befindet (Abbildung 2.4).



Abbildung 2.4: Verdeckung zweier Rechtecke

#### 2.2.1.2 Texturgradient

Als Texturgradient versteht man das Verändern der Dichte von Elementen in einem Bild in Abhängigkeit der Entfernung zum Beobachter. Ein Texturelement, welches sich näher am Beobachter befindet, erscheint detaillierter und klarer als weiter entfernte Texturelemente. Sehr weit entfernte Texturelemente verschwimmen, so dass fast nur noch eine

homogene Fläche gesehen werden kann, wie es Abbildung 2.5 veranschaulicht. Diese visuelle Information hilft, eine Tiefenabschätzung durchzuführen.

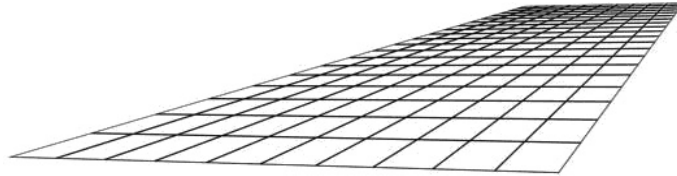


Abbildung 2.5: Darstellung eines einfachen Texturgradienten

### 2.2.1.3 Lineare Perspektive

Die Größe von Elementen in einem Bild verändert sich bei der linearen Perspektive mit dem Abstand. Weiter entfernte Objekte werden kleiner wahrgenommen und nähere Objekte größer. Ein weiteres Merkmal wird z.B. durch zwei parallel verlaufende Schienen gezeigt. Sie scheinen in der Ferne zu konvergieren. Abbildung 2.6 illustriert die beiden Sachverhalte.

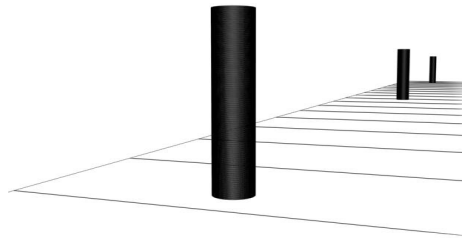


Abbildung 2.6: Zwei Merkmale der Perspektive: relative Größe und scheinbares Konvergieren

### 2.2.1.4 Schatten und Schattierung

Es gibt zwei Arten von Schatten, den "Schlagschatten" und den "Körperschatten". Ein Körperschatten befindet sich auf einem Objekt und stellt somit eine Schattierung des Objektes dar, während der Schlagschatten auf die Oberfläche eines anderen Objektes projiziert wird. In Abbildung 2.7 scheint die erste Kugel (1) kein räumlicher Körper zu sein. Sie wird eher als eine flache Scheibe wahrgenommen. Beim Hinzufügen von Schatten und

Schattierung (2) erscheint sie wie ein räumlicher Körper, der auf einer Oberfläche ruht. Der Schattierungsgradient macht aus der flachen Scheibe (1) einen Körper (2 und 3). Wenn der Schlagschatten nicht länger an das Abbild des Gegenstandes gekoppelt ist (3), scheint der Körper über der Oberfläche zu schweben.

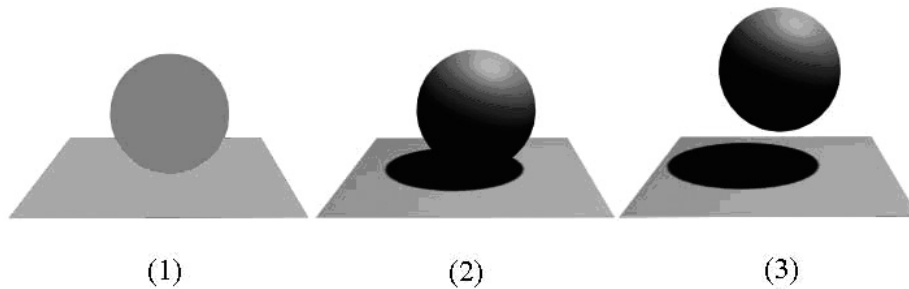


Abbildung 2.7: Die Auswirkung von Schlagschatten und Körperschatten auf Objekte

#### 2.2.1.5 Helligkeit

Die Helligkeit von Objekten wird benutzt, um einen Eindruck von Abstand und Tiefe der Objekte untereinander beim Betrachter zu erzeugen. Hierzu gibt es allerdings zwei Lehrmeinungen, die sich zunächst zu widersprechen scheinen. Die eine ist die seit Jahrhunderten in der Malerei übliche und besagt, dass die Farben von Gegenständen mit größerer Entfernung verblassen, heller werden und sich ins Bläuliche verfärben [26].

In Bezug auf die Gestaltung virtueller Räume wird meist gelehrt [27], daß nahe Objekte heller und klarer erscheinen, wohingegen weiter entfernte Objekte matter und dunkler wahrgenommen werden. Diesen Sachverhalt zeigt Abbildung 2.8.

Dieser scheinbare Widerspruch scheint aber auflösbar, wenn man bedenkt, dass die traditionelle Regel der Malerei für offene Landschaften aufgestellt wurde, während es bei der Gestaltung virtueller Umgebungen meist um geschlossene Räume geht.

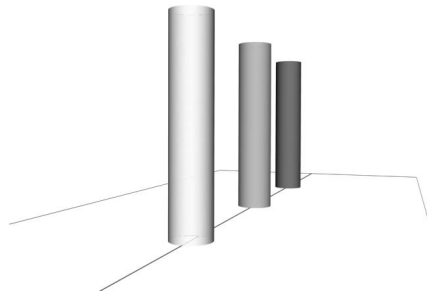


Abbildung 2.8: Die Helligkeit von Objekten zum Abschätzen des relativen Abstandes

### 2.2.2 Der Unterschied zwischen Bewegungsparallaxe und Tiefenhinweis

Bewegungsparallaxe basiert auf Bewegung. Durch die Bewegung werden vom visuellen System Bilder aus verschiedenen Blickperspektiven aufgenommen, wobei nähere Objekte sich schneller bewegen als entfernte. Mit Hilfe dieser Wahrnehmung entsteht ein eindeutiger Tiefeneindruck.

Im Gegensatz dazu stehen die oben aufgezählten weiteren Tiefenhinweise. Sie basieren auf statischen Eindrücken und finden beispielsweise in Bildern Anwendung. Damit wird ein Tiefeneindruck der dargestellten Objekte und somit auch der gesamten Szene vermittelt. Die zweidimensionalen Informationen der bildhaften Tiefenhinweise werden vom visuellen System als dreidimensional interpretiert, wobei die Schwierigkeit in der Bewertung möglicher Mehrdeutigkeiten besteht.

## 2.3 Gibson's optisches Feld

Wie schon oben erwähnt, fasst Gibson [5] die gesehene Umgebung als ein "optisches Feld" auf. Dieses Feld ist für jeden Beobachtungspunkt anders. Es hat eine bestimmte Ausrichtung bzw. Anordnung, die von Ort und Bewegungsvektor des Betrachters abhängt. Das Feld beinhaltet für jedes Objekt, das ein Beobachter von einem Beobachtungspunkt aus sieht, einen eindeutigen Raum- bzw. Schnittwinkel. Wenn der Beobachter in Bewegung ist, enthält das Feld zusätzliche Geschwindigkeitsvektoren für die jeweiligen Positionen im Feld. Je größer der Betrag der Vektoren, desto höher ist die wahrgenommene Geschwindigkeit in diesem Punkt des Sichtfeldes des Beobachters (Abbildung 2.9).

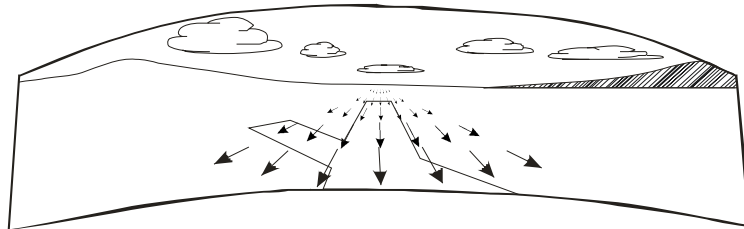


Abbildung 2.9: Ein Beispiel für das optische Feld eines Beobachters in Bewegungsrichtung, wie hier z.B. das eines Piloten im Landeanflug (nach Gibson)

Die Perspektive beschreibt Gibson wie folgt: bewegt sich der Beobachter, so verändern sich die Winkel im Feld. Die Gradienten der Winkelgrößen und -dichten verändern sich an den Meridianen des Feldes. Entfernte Objekte haben kleine Winkel und eine hohe Dichte, nahe Objekte genau umgekehrt. Im Fluchtpunkt am Horizont des Feldes läuft die Dichte ins Unendliche. Je kleiner die Bewegungen des Beobachters sind, desto kleiner sind auch die Änderungen im Feld. Dabei sagt man, dass das optische Feld fließt und nicht von einer Struktur zu einer anderen wechselt.

Ein weiteres wichtiges Prinzip ist, dass wahrgenommene Oberflächen einmal "aus der Sicht eines sich bewegenden Beobachters gehen" oder "in die Sicht kommen". Das erste geschieht in einer Richtung der Fortbewegung, das zweite in der entgegengesetzten. Diesem Prinzip verwandt ist die Bewegungsparallaxe und die Überlagerung von Objekten. Wenn sich Objekte überlagern, dann werden schrittweise Strukturen aus dem Feld gelöscht. Andererseits werden schrittweise Strukturkomponenten in das Feld eingefügt, wenn diese aufgedeckt werden. Bei der Bewegungsparallaxe haben die Geschwindigkeitsvektoren von Objekten eine große Bedeutung. Bewegt man sich kontinuierlich vorwärts und schaut z.B.  $90^\circ$  nach rechts, dann beinhaltet das optische Feld nahe am Beobachter lange und weiter zum Horizont immer kürzere Vektoren entgegen der Bewegungsrichtung. Diesen Sachverhalt illustriert Abbildung 2.10.



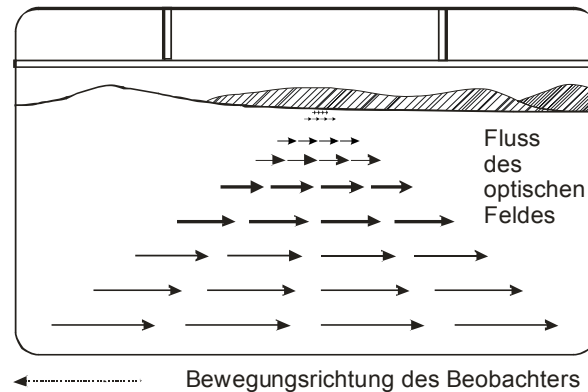


Abbildung 2.10: Das optische Feld eines Beobachters senkrecht zur Bewegungsrichtung

An den Grenzen des Sichtfeldes haben die Vektoren ebenfalls einen kleineren Betrag als die Vektoren im Zentrum des Sichtfeldes, d.h. im Zentrum des Sichtfeldes wird die höchste Geschwindigkeit wahrgenommen, die besonders zum Horizont und etwas geringer zu den Grenzen des Sichtfeldes hin abnimmt.

Schatten, Schattierung und somit auch unterschiedliche Helligkeiten werden im optischen Feld durch das Layout der Umgebung, also die Anordnung und den Aufbau des optischen Feldes, beschrieben. Wenn Licht auf eine Oberfläche trifft, dann verändert sich das optische Feld, so dass Informationen bezüglich der Pigmentierung und Schattierung einer Oberfläche aufgenommen werden. Bewegt sich die Lichtquelle oder der Beobachter, so verändern sich auch die Gradienten für die Beleuchtung von Objekten im optischen Feld. Es verändert sich stets die Struktur des optischen Feldes.

Die Grenzen des Blickfeldes eines Beobachters verhalten sich in etwa wie "verdeckende Kanten". Objekte verschwinden aus dem oder gelangen in das Sichtfeld. Bewegt sich der Beobachter, um beispielsweise die Bewegungsparallaxe wahrzunehmen, so nimmt er auch seine Extremitäten am Rande seines Blickfeldes wahr. Er hat damit das Gefühl, ein Teil von dem zu sein, was er sieht. Er ist in der Umgebung anwesend.

Der Texturgradient kann ebenfalls mit dem oben genannten Prinzip beschrieben werden: die Textur z.B. einer Straße, die man in einem schrägen Winkel betrachtet, verschwindet in einem Fluchtpunkt am Horizont des optischen Feldes. Genau in diesem Punkt konvergiert die Straße in der Ferne. Die Dichte der Strukturelemente im Feld, die die Straße repräsentieren, nimmt zum Horizont hin zu. Der Horizont kann analog zu einer verdeckenden Kante angesehen werden.

Das optische Feld beinhaltet folglich nicht nur Informationen über die Umgebung, die man wahrnimmt, sondern auch über die eigene Position im Raum. Es sind auch Informationen über die Person selbst enthalten, in Form ihrer Beine, Füße, Hände, Arme, etc..

Für die subjektive Qualität von virtuellen Umgebungen ist es also wichtig, sie so zu gestalten, daß der Betrachter diesen zuletzt beschriebenen Effekt wahrnimmt. Das kann z.B. durch eine Bodenprojektion geschehen, die er betreten kann. Damit wird der wahrgenommene Grad seiner "Immersion" in die virtuelle Umgebung wesentlich erhöht.

Die nächste Frage ist allerdings: was versteht man eigentlich unter "Immersion" und durch welche Faktoren wird sie beeinflusst?

## **2.4 Immersion**

### **2.4.1 Beschreibung der Immersion**

"Immersion" (lat.) wird im Duden [28] wie folgt definiert:

- "Ein-, Untertauchen, z.B. eines Himmelskörpers, in den Schatten eines anderen".

Immersion würde also den Grad des Eintauchens in die virtuelle Welt widerspiegeln, festlegbar durch objektive Bedingungen.

Der Begriff "Präsenz" taucht meist im Zusammenhang mit Immersion auf und ist ein wichtiger Bestandteil des Immersionsgefühls. Er kann umschrieben werden mit:

- dem Gefühl, dass man sich selbst in der virtuellen Umgebung befindet und dass diese Umgebung real ist.

Wichtig ist in diesem Zusammenhang der Hinweis darauf, daß Reize aus der realen Umgebung manchmal nicht mehr wahrgenommen ("ausgeblendet") werden, obwohl sie objektiv noch auf die Personen in der virtuellen Umgebung einwirken. Man spricht hier auch vom "subjektiven Erleben". Es ist allgemein bekannt, dass virtuelle Realität ihre Stärke durch das Fesseln der Aufmerksamkeit eines Benutzers erreicht, um ein Gefühl von Immersion und Präsenz zu veranlassen.

Manchmal wird nur Immersion benutzt, um beide Begriffe zu umfassen. Manchmal betrachtet man eine weitere Teilung in physikalische und mentale Komponenten eines jeden Begriffs, wie z.B.:

1. Immersion ist ein "Gefühl von Sehr-beschäftigt-Sein", wobei Teilnehmer eine Phantasiewelt betreten, als ob es die reale Welt wäre [29].
2. Immersion kann auf Basis immersiver Grafik aufgefasst werden, gemäß umfassender multimedialer Bildschirme (Bilder, Geräusche, fühlbare Effekte etc.), die einen umgeben, so dass alle Sinne eingetaucht scheinen und die Grenze zwischen der realen und der illusionären Welt verschwindet [30].

3. Die mentale Seite der Immersion wird bestimmt durch die emotionale Reaktion der Beobachter auf die virtuelle Welt, wenn sie selbst Teil dieser Welt sind. Präsenz ist ein Gefühl der Integration in die Umgebung und der Möglichkeit, mit dort existierenden Objekten zu interagieren [31].

Es gibt also viele (und damit eigentlich keine allgemeingültigen) Definitionen für diese Begriffe. Ein Grund dafür ist offenbar ihr subjektiver Charakter. Immersion hängt in einer virtuellen Umgebung von vielen Faktoren ab, einschließlich der Gefühle und mentalen Prozesse der Nutzer, die mit der Technologie konfrontiert werden, der Art der möglichen Interaktion und der Aufgabenstellung in der aktuellen Anwendung. Der Versuch, Immersion allgemein zu beschreiben ist also schwierig, da die subjektiven Empfindungen eine zu große Rolle spielen. Einschränkungen der Technologie, Benutzererfahrungen, körperliches Befinden und die Versuchsbereiche sind weitere Faktoren, die möglicherweise die Immersivität einer virtuellen Umgebung auf den Nutzer beeinflussen.

#### **2.4.2 Reize und Immersion**

Ein anderer Weg, Immersion und Präsenz zu betrachten, ist, sich von der Betrachtung psychologischer Aspekte zu lösen und sich auf die menschlichen Sinne - wie z.B. Sehen, Hören, Fühlen, Riechen und das Gleichgewicht - zu konzentrieren. Diese Sinne sind diejenigen, die direkt im Kontakt mit unserer Umgebung stehen und daher auch mit jeder Technologie der virtuellen Realität. Sie binden uns in eine Umgebung ein. Einige Beispiele [29] sollen dies verdeutlichen.

##### **2.4.2.1 Realität und Immersion**

Der übliche immersive Zustand, den man im Alltag antrifft, ist die "Realität". Sie kann als ein Ausgangsniveau der vollen Immersion betrachtet werden. Der Benutzer ist physisch und mental in die Realität eingetaucht. Das wahrgenommene und das mentale Modell des Nutzers der aktuellen Umgebung stimmen überein.

Dabei werden auch Fähigkeiten der Menschen wie Erkennen, Beurteilen, Erinnern oder Vorstellung angesprochen. Eine Sammelbezeichnung für alle Prozesse oder Strukturen, die mit diesen Fähigkeiten zusammenhängen, ist der Begriff der "Kognition". Kognition umfaßt die Wechselwirkung zwischen äußerlich abgeleiteten Sinnesphänomenen und intern generierten Modellen und Erwartungen sowie daraus resultierenden Lernprozessen. Dabei wird angenommen, daß die physischen Sinne (konzentriert auf die Umgebung) durch die mentalen Prozesse (und kombiniert mit den momentanen internen Prozessen) einer Person gefiltert werden, um eine mentale Umgebung zu formen, die die reale Umgebung widerspiegelt.

Ein anderer Fall ist der Prozess des Träumens. Die Sinne einer Person sind aktiv unterdrückt und es herrscht ein Mangel an Stimulation. Die reduzierte Sinnesstimulation mindert daher die Bindung der Person zu ihrer Umgebung, was zum Schlaf oder Traumzustand führen kann. Im Traum stimmt die aktuelle Umgebung nicht mehr mit dem mentalen Modell überein. So kann ein Traum sehr lebhaft real erscheinen - trotz eines Mangels an Sinneseingaben.

Ähnlich dem immersiven Traumzustand ist eine Umgebung, welche z.B. im Kino gegeben ist. Die Personen sitzen in einem abgedunkelten Raum mit erweitertem Ton und einem konzentriertem Sichtfeld auf die Leinwand. Ihr Beschäftigungsniveau ist durch die konzentrierten Sinne, Sehen und Hören, geprägt. Der "Kamerablick" verschmilzt mit dem des Betrachters, und es entsteht somit eine Einbindung des Betrachters in den Film bzw. die Handlung (Kinoimmersion).

Obwohl die Zuschauer ein gewisses Immersionsniveau erreichen können, gibt es jedoch viele Faktoren, die den Effekt der Immersion reduzieren. Das Interesse einer Person, lokale Hintergrundgeräusche und der momentane mentale Zustand sind z.B. beeinflussende Elemente. Hinzu kommt die Abstimmung des Blickfeldes mit der Leinwandgröße. Ist schon das Gesichtsfeld größer als die Darstellungsfläche auf der Leinwand, so ist eine Illusion der Immersion kaum zu erzielen.

#### **2.4.2.2 Virtuelle Realität**

Im Prinzip stellt sie eine Weiterentwicklung der letztgenannten Beispiele dar: eine Person befindet sich physisch in einer realen Umgebung, aber ihre mentale Umgebung ist illusionär, geschaffen durch Täuschung der Sinne, durch Versorgen dieser mit einigen äußeren künstlichen Sinnesreizen. Die Person wird Teil der Illusion. Objekte der virtuellen Realität befinden sich in der gleichen Umgebung wie sie selbst. Die Nutzer empfinden sich selbst "im Innern" einer Szene und haben ein räumliches Verständnis von Objektpositionen und -größen in Bezug zu ihrem eigenen Körper. Man wird in der virtuellen Realität künstlichen Reizen ausgesetzt, die als real empfunden werden und entsprechende Reaktionen auslösen. Die Testpersonen hören auf, daran zu denken, dass sie mit einem Computer interagieren, sie interagieren mit der virtuellen Realität [29, 30]. Die physischen Sinne reagieren aus der illusionären Umgebung und schaffen so eine mentale Umgebung, welche sich von der momentanen physischen Umgebung unterscheidet.

Der aktuelle Sinnesreiz bestimmt in allen Fällen sehr stark den Grad der Immersion. Wenn mentale und physikalische Umgebungen sehr stark übereinstimmen, dann hat die Person ein Gefühl von "hier sein", wenn aber die mentale und physikalische Umgebung divergieren, hat die Person vielleicht ein Gefühl von "dort sein" [29, 32].

In der virtuellen Realität kann Immersion möglicherweise auf die Definition der mentalen Präsenz, dem Gefühl von "dort sein", durch die benutzte Technologie der virtuellen Realität abgebildet werden. Diese Technologien können dazu verwendet werden, um die physikalischen Sinne aufzuheben und den Benutzer in die illusionäre Umgebung eintauchen zu lassen.

### 2.4.3 Klassifikation des Immersionsgrades und von "dort sein"

Der visuelle Sinn ist gewöhnlich der primäre Reiz, den der Beobachter zu verarbeiten hat. Ein ausreichender Grad an Immersion ist aber damit noch nicht zu erreichen. Das Hinzufügen weiterer Modi, wie z.B. Hör- und Tastsinn, kann zu einem erhöhten Immersionsniveau führen. Aufgrund der subjektiven Natur von Immersion und Präsenz sind Nutzeruntersuchungen der einzige Weg, um zu bestimmen, zu welchem Anteil eine Technologie den Grad der Immersion [29] bestimmt.

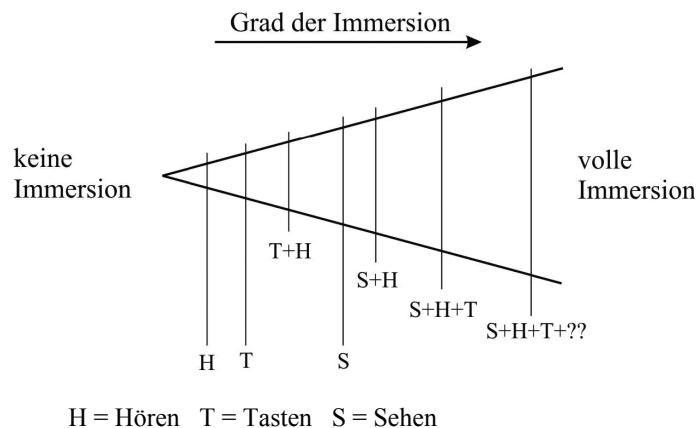


Abbildung 2.11: Mögliche Klassifikation des Immersionsgrades nach Smith [29]

Abbildung 2.11 zeigt die typischen, auf die virtuelle Realität fokussierten Sinne mit einer möglichen Klassifikation, basierend auf dem Immersionsgrad. Es ist nicht nur wünschenswert, die verschiedenen Niveaus der Immersion für jeden einzelnen Sinn zu bestimmen, sondern auch den Unterschied der Skalierung zwischen den Modalitäten festzuhalten, z.B. Vergleich der Unterschiede zwischen nur Tasten und Tasten mit Hören zu nur Sehen und Sehen mit Hören. Systeme der virtuellen Realität versuchen, das "dort

sein"-Gefühl der Präsenz zu erreichen, was gleichbedeutend mit der Erhöhung des Immersionsgrades ist.

#### **2.4.4 Die Immersion beeinflussende Faktoren**

Es gibt zahlreiche Faktoren, welche das Gefühl der Immersion einer Person beeinflussen. In [29] wird dabei das Interesse am präsentierten Material angesprochen und auf eventuelle lokale Hintergrundgeräusche hingewiesen. Aber auch der aktuelle mentale Zustand einer Person ist in Bezug zur Immersion ausschlaggebend. Im Allgemeinen existieren vier Hauptfaktoren [31], die sich nach [33] weiter unterteilen lassen.

##### **1. Kontrollfaktoren:**

- Grad der Kontrolle (Fähigkeit der Kontrolle der Relation zwischen Sensoren und Umgebung),
- Unmittelbarkeit der Kontrolle (Verzögerung zwischen Handlung und erkennbarem Resultat),
- Erwartung von Ereignissen (treten erwartete Ereignisse ein?),
- Art und Weise der Kontrolle (muss diese erlernt werden?),
- Veränderbarkeit von Objekten der virtuellen Realität (Modifikation von Objekten).

##### **2. sensorische Faktoren:**

- detaillierte Modellgestaltung,
- multimodale Präsentation (vollständige und zusammenhängende Stimulation aller Sinne),
- Konsistenz multimodaler Information (Vermittlung von Botschaften, die der Erfahrung entsprechen),
- Grad der Bewegungswahrnehmung (Objekte bewegen sich relativ zum Beobachter),
- Veränderung des Standpunktes in der virtuellen Umgebung.

##### **3. ablenkende Faktoren:**

- Isolation des Beobachters (lokale Hintergrundgeräusche),
- Selektive Aufmerksamkeit (Fokussierung auf Reize der virtuellen Umgebung),
- Schnittstellenbewusstsein (Eingabegeräte, Sensoren).

##### **4. Realitätsfaktoren:**

- Funktion als Realität einer Szene (Texturen, Lichtquellen etc.),

- Konsistenz mit Informationen der objektiven/realen Welt,
- Wichtigkeit der Erfahrung,
- Desorientierung oder Angstzustände (wenn z.B. Benutzer aus der virtuellen Welt in die reale Welt zurückkehren).

### **3. Eigener Lösungsansatz**

Auf der Basis der dargestellten Überlegungen wurde nun am IPP versucht, eine virtuelle Umgebung zu schaffen, die es gestattet, zu untersuchen, wie sich die genannten Faktoren mit vernünftigem technischen Aufwand realisieren lassen und wie ihre Wirkung auf die Benutzer einer entsprechenden virtuellen Umgebung von diesen bewertet wird.

#### **3.1 Vorhandene Hard- und Software**

Die Prinzipien der Auslegung und des Aufbaues des Virtual Reality Labors des Instituts für Prozess- und Produktionsleittechnik wurden schon an verschiedenen Stellen beschrieben [18, 34, 35]. Diejenigen Leser, die sich eingehender über die technischen Details informieren möchten, seien auf die Arbeit von Walter [36] verwiesen. Zum besseren Verständnis der folgenden Ausführungen sollen hier aber noch einmal kurz einige technische Daten angegeben werden: die Anlage erlaubt die Projektion von dreidimensionalen Umgebungen auf eine Fläche von  $14 \text{ m}^2$  mit einer Auflösung von  $5120 \times 1536$  Bildpunkten. Die Rückprojektionsleinwände wurden für die Zwecke der beschriebenen Untersuchungen in einem Halbkreis aufgestellt und bilden jeweils zueinander einen Winkel von  $36^\circ$ . Jede der fünf Leinwände wird mit zwei übereinander angeordneten Beamern angestrahlt, wobei jeweils eine SGI-Workstation die Berechnung der Bilder übernimmt. Abbildungen 3.1 und 3.2 zeigen schematisch diese Anordnung und die entsprechende Hardwarestruktur.

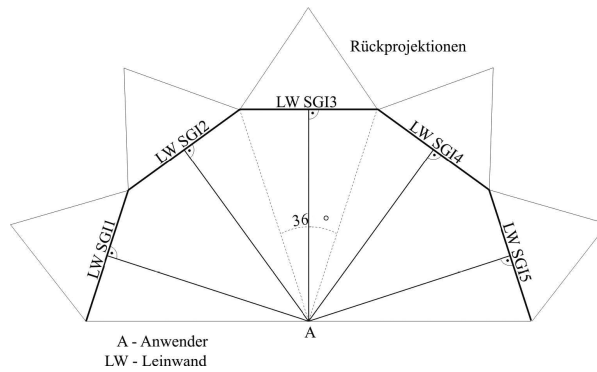


Abbildung 3.1: Leinwandanordnung im VR-Labor des IPP

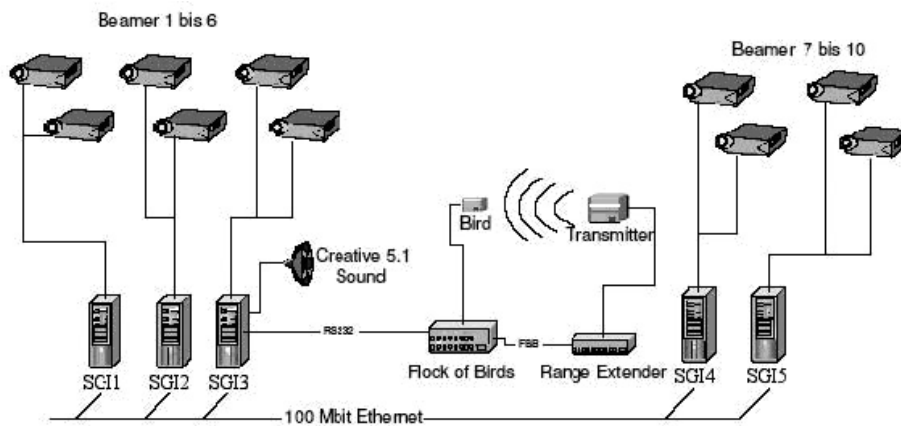


Abbildung 3.2: Das Hardwaresystem des VR-Labors im IPP

Ort, Bewegung und Blickrichtung der Betrachter werden durch ein elektromagnetisches Trackingsystem erfasst. Hierfür wurde das System von Ascension (Flock of Birds) [37] ausgewählt, das an den Rechner SGI3 angeschlossen ist. Es besteht aus dem eigentlichen "Bird", d.h. dem Sensor mit der zugehörigen Elektronikeinheit, sowie dem Range Extender mit angeschlossenem Transmitter. Der Transmitter erzeugt eine Magnetfeldkugel mit einem Durchmesser von ca. 3 m und erlaubt dem Sensor eine Positioniergenauigkeit von 1,8 mm und einer Winkelpräzision von 0,5°. Damit steht für die Erfassung von Positionsdaten ein leistungsfähiger Sensor mit sechs Freiheitsgraden zur Verfügung.



### 3.2. Das gewählte Modell

Als virtuelle Umgebung wurde ein Modell einer Werkhalle erstellt. Das Modell entspricht einer real vorstellbaren Halle, ist sehr einfach gehalten und bietet somit die nötige Flexibilität für durchzuführende Versuche. In der Halle befinden sich drei Reihen zu je zehn Säulen, ein Quader mit einem Metermaß und ein weiterer Quader mit Löchern. Der Quader mit dem Metermaß hat eine Höhe von 2 m, eine Breite und Tiefe von 1 m. Die Höheneinteilung wird durch eine passende Textur dargestellt. Dieser Quader dient als visuelle Hilfe, um ein Gefühl für die Dimensionen der Halle zu erzeugen (Abbildung 3.3). Der hintere Teil des Modells (F1) wird über eine Lichtquelle ausgeleuchtet.

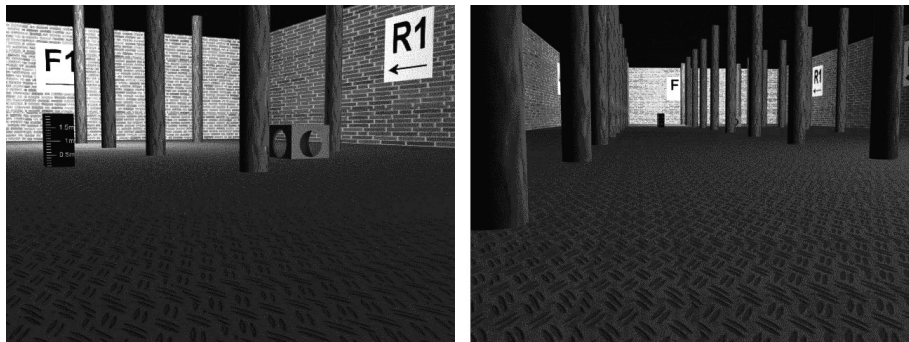


Abbildung 3.3: Das Werkhallenmodell von zwei Standpunkten (s. Abb. 3.4) aus betrachtet

Um eine leichtere Orientierung zu ermöglichen, befinden sich an den Wänden Hinweistafeln. Die Säulen haben eine Höhe von 12 m und einen Durchmesser von 1 m. Untereinander haben sie jeweils einen Abstand von 10 m. Die Säulenreihen haben zu ihren nächsten Wänden ebenfalls einen Abstand von 10 m. Somit sieht das Modell schematisch wie in Abbildung 3.4 aus. Insgesamt hat die virtuelle Halle eine Breite von 43 m, eine Länge von 120 m und eine Höhe von 12 m.

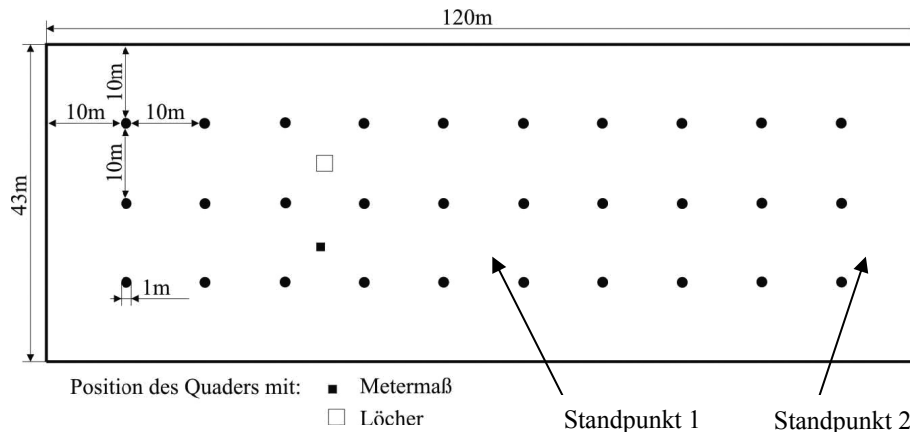


Abbildung 3.4: Grundriss des gewählten Modells

### 3.3 Gewählter Lösungsansatz

Für die Bewegung durch das virtuelle Modell der Werkhalle wurde eine Version gewählt, die es gestattet, den gesamten Sensorbereich des Trackingsystems auf die Ausmaße des Werkhallenmodells zu übertragen. Abbildung 3.5 skizziert in etwa den nutzbaren Sensorbereich für die mögliche körperliche Bewegung durch das virtuelle Modell. Die Bewegungsparallaxe wird durch die Art und Weise der Bewegung durch das Modell wahrnehmbar. Um im Sinne von Abschnitt 2.4.2 mehrere Sinne anzusprechen, wird bei Kollision mit virtuellen Objekten ein akustisches Warnsignal abgespielt. Des Weiteren wurde versucht, die Tiefenhinweise gemäß 2.2.1 umzusetzen und zu demonstrieren.

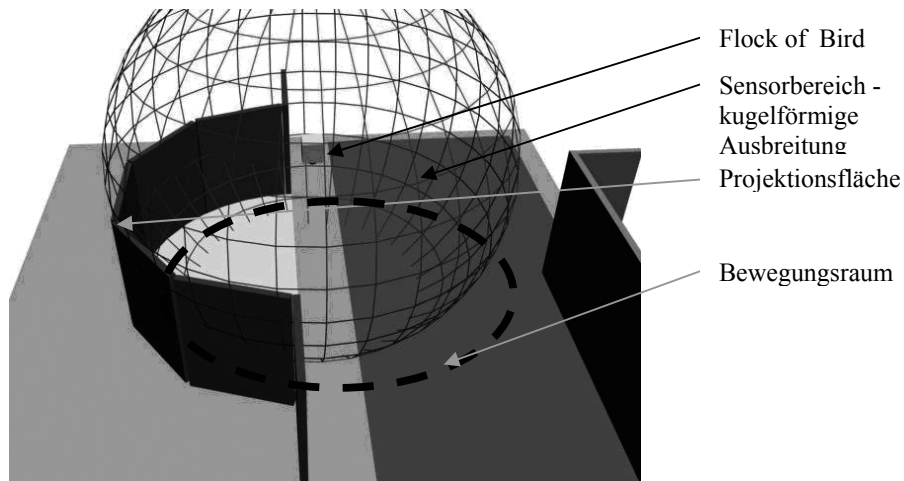


Abbildung 3.5: Der Erfassungsbereich des Positionssensors

## 4. Beschreibung der Lösung

### 4.1 Realisierung

Für eine natürliche Interaktion mit der virtuellen Umgebung wurden eine skalierte Translation zur Wahrnehmung der Bewegungsparallaxe, eine Kollisionsabfrage und eine geeignete Bodenprojektion realisiert.

#### 4.1.1 Bewegung durch das Modell

Für die Bewegung durch das virtuelle Modell wurde eine skalierte Translation gewählt, da es größere Ausmaße hat als der zur Verfügung stehende Sensorraum. Der reale Bewegungsraum des Betrachters wird in Relation zu den Maßen des virtuellen Werkhallenmodells gesetzt. Durch diese Koordinatenabbildung ist jede Stelle des virtuellen Werkhallenmodells durch den Benutzer erreichbar. Mit Hilfe des Quaders und der darauf abgebildeten Skaleneinteilung (Metermaß) kann eine vertikale Bewegung kontrolliert werden. Mit Hilfe dieser Koordinatenabbildung kann man bereits, wie in Abschnitt 2.2 beschrieben, die Bewegungsparallaxe durch die Simulation des Werkhallenmodells wahrnehmen.

Man stellt sich beispielsweise vor eine Säulenreihe, so dass sich alle Säulen in einer Linie befinden. Dann bewegt man sich nach links und rechts, so dass man einmal links bzw. rechts neben der Säule vorbei blickt (Abbildung 4.1). Man bemerkt, dass sich die weiter entfernten Säulen langsamer bewegen als die näheren. Dies entspricht auch dem natürlichen Vorgehen, wenn man die räumlichen Beziehungen von Objekten beurteilen möchte, aber die momentane Situation es nicht zulässt, näher zu treten.

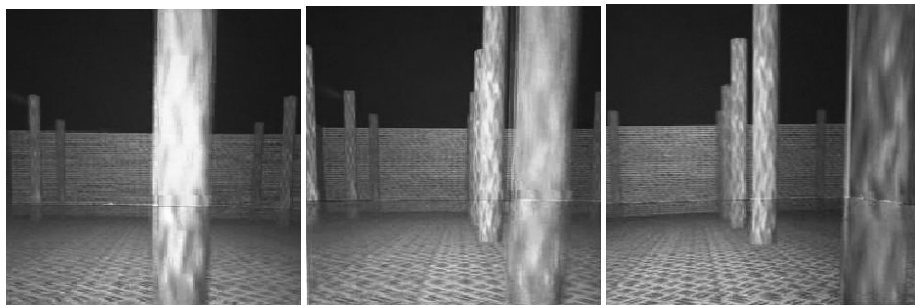


Abbildung 4.1: seitliches Betrachten einer Säulenreihe

#### 4.1.2 Kollisionsabfrage

Einen weiteren wichtigen Punkt stellt die Kollisionsabfrage dar. Wie auch in einer realen Umgebung kann man mit Objekten einer virtuellen Umgebung zusammenstoßen. Bei einer Kollision in einer realen Umgebung verspürt man einen Widerstand an der Stelle des Zusammenstoßes, meist in Verbindung mit einer mehr oder weniger direkten Meldung an das Schmerzzentrum des Menschen, je nachdem wie intensiv die Kollision erfolgte. Infolgedessen sollte man vom System eine äquivalente Rückmeldung des Ereignisses einer Kollision bekommen. Im Virtual Reality Labor des IPP kann diesbezüglich nur das visuelle und auditive System angesprochen werden. Kommt eine Kollision mit einem Objekt der virtuellen Umgebung zustande, wird die Simulation für die Dauer der Kollision angehalten. Die Aufhebung einer Kollisionssituation hängt von der weiteren Bewegung des Beobachters ab. Um die Wirkung der Kollision auf den Beobachter zu verstärken, wird das auditive System durch das Abspielen eines akustischen Warnsignals angesprochen. Die Kollisionsabfrage wird auf alle Objekte des Modells angewandt, d.h. auf Wände, Säulen, und sonstige Gegenstände, die sich in der Werkhalle befinden.

#### 4.1.3 Bodenprojektion

Mit Hilfe der Bodenprojektion wird versucht, die in Abschnitt 2.3 kurz geschilderte Gibson'sche Theorie der Selbstwahrnehmung in einer Umgebung und auch der Bewegungswahrnehmung an den Rändern des optischen Feldes modellhaft nachzuprüfen. Wie dort dargestellt, wird Bewegung im gesamten optischen Feld wahrgenommen. An der Stelle der Blickfokussierung wird sie und somit auch die relative Geschwindigkeit am deutlichsten gesehen. Zu den Rändern des optischen Feldes nimmt die wahrgenommene Geschwindigkeit zwar ab, wird aber immer noch registriert.

Ein weiterer wichtiger Punkt ist das Wahrnehmen des eigenen Körpers bzw. von Teilen davon in einer Umgebung. Man sieht ständig seine eigenen Extremitäten aus dem Blickfeld verschwinden und wieder zurückkehren, wenn man z.B. läuft. Mit Hilfe der Bodenprojektion hat man sozusagen den Fußboden der virtuellen Umgebung unter den eigenen Füßen. Der Eindruck, in die virtuelle Umgebung eingetaucht zu sein, wird dadurch verstärkt.

Eine entsprechende Bodenprojektion wurde verwirklicht. Der Immersionseffekt wird hierdurch sehr deutlich. Mit Hilfe der Bodenprojektion steht man selbst im Werkhallenmodell und hat dessen texturierten Fußboden unter den eigenen Füßen. Abbildung 4.2 zeigt zwei Fotos, die während der Simulation aufgenommen wurden. Zu sehen ist der Übergang der virtuellen Objekte des Modells von der vertikalen Projektionsleinwand auf die Bodenprojektion.

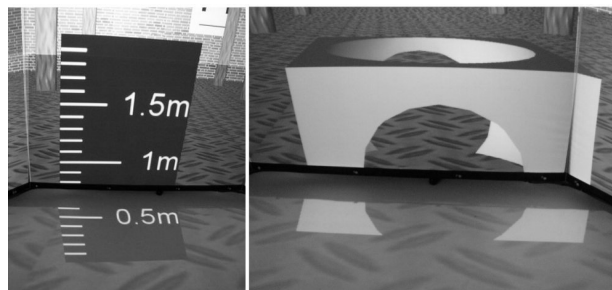


Abbildung 4.2: Übergang virtueller Objekte von der vertikalen Projektionsleinwand auf die Bodenprojektion

#### 4.2 Andere Tiefenhinweise

Die Bewegungsparallaxe ist ein Tiefenhinweis, der im visuellen System eines Menschen erzeugt wird, wenn sich die betreffende Person bewegt. Neben der Bewegungsparallaxe

gibt es weitere Tiefenhinweise. Diese basieren auf bildlichen, zweidimensionalen Informationen, welche dann vom Menschen als Tiefe interpretiert werden (siehe Abschnitt 2.2.1). In der beschriebenen Arbeit wurden folgende dieser Hinweise umgesetzt:

- Überlagerung bzw. Verdeckung (Abbildung 4.3),
- Texturgradient (Abbildung 4.4),
- Schattierung (Abbildung 4.5),
- Helligkeit (Abbildung 4.6) und
- Perspektive (Abbildung 4.7).

Dadurch sind zusätzliche Faktoren vorhanden, durch deren Einfluß die virtuelle Umgebung intensiver wahrgenommen und der Grad der empfundenen Immersion wesentlich erhöht wird. Eine Einschränkung mußte jedoch in Kauf genommen werden: das verwendete Modellierungssystem [38] erlaubt die Darstellung von Körperschatten, aber nicht die von Schlagschatten (siehe Abschnitt 4.3).

Für die Wahrnehmung der Verdeckung bzw. Überlagerung sind jeweils zwei Objekte erforderlich, die in zwei verschiedenen Tiefen positioniert sind. Abbildung 4.3 stellt Verdeckungen bzw. Überlagerungen von Objekten dar, gekennzeichnet durch weiße Kreise.

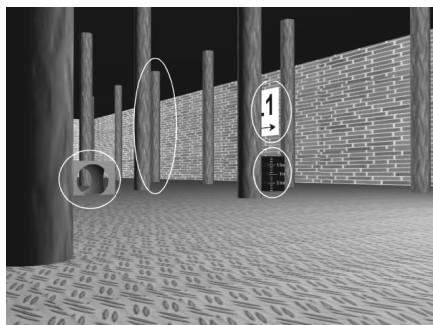


Abbildung 4.3: Überlagerung

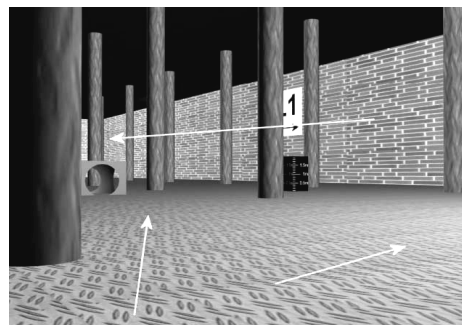


Abbildung 4.4: Texturgradienten

Blickt man auf die Oberfläche eines Objektes, so erkennt man seine Textur. Je nach Blickwinkel kann der Texturgradient wahrgenommen werden. Je schräger man auf die Oberfläche schaut, desto klarer ist der Texturgradient zu erkennen (siehe Abschnitt 2.2.1.2). In Abbildung 4.4 deuten die eingetragenen weißen Pfeile den Verlauf verschiedener Texturgradienten an.

Die Helligkeit (siehe Abschnitt 2.2.1.5) kann ebenfalls zur Beurteilung von relativen Abständen in Bildern genutzt werden. Alle an der Bewertung des Modells (Abschnitt 4.5) beteiligten Personen schätzen die Helligkeitsänderung aus ihrer Erfahrung (rein subjektiv)

heraus als realistisch ein (Abbildung 4.5). Der Quader mit der Skaleneinteilung wirkt heller und steht näher am Beobachter. Im Gegensatz dazu wirkt die hinterste Säule sehr dunkel.

Mit Hilfe der Schattierung werden Objekte als reale, massive, voluminöse Körper wahrgenommen, nicht nur als Flächen, wie in Abschnitt 2.2.1.4 bereits beschrieben. In Abbildung 4.6 wird dieser Effekt durch den Schattenverlauf innerhalb des Quaders wiedergegeben. Eine weitere Schattierung ist auf den texturierten Säulen sichtbar. Der Verlauf der Schattierung ist durch Pfeile markiert.

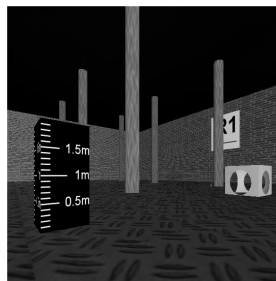


Abbildung 4.5: Schattierung von Objekten

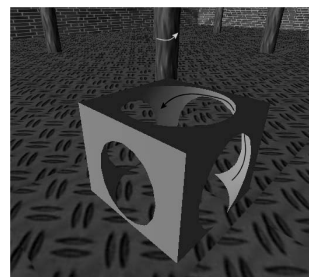


Abbildung 4.6: Helligkeitsverlauf im Modell

Die verwendete Software bietet zwei verschiedene Projektionsarten an. Dies sind die perspektivische und parallele Projektion. Die beiden Projektionsarten unterscheiden sich lediglich durch die Position des Zentrums der Projektion in Bezug zur Projektionsebene [27]. Abbildung 4.7 zeigt links die zentrale und rechts die parallele Projektion. In der dargestellten Arbeit wurde die Zentralprojektion verwendet, da sie der natürlichen Sehweise entspricht.

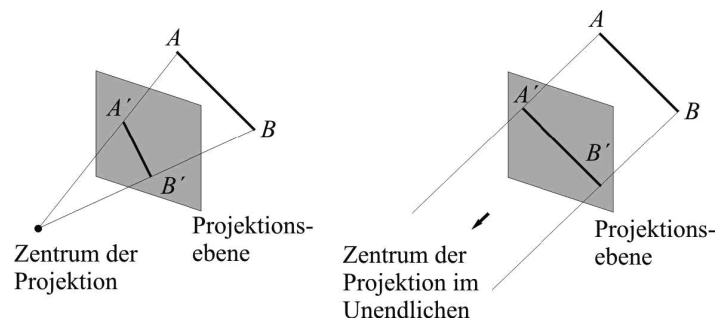


Abbildung 4.7: Schematische Darstellung der Zentral- (links) und Parallelprojektion (rechts)

### 4.3 Die Problematik des Schattenwurfs

Schattierungen sind mit der benutzten Software (WorldUp<sup>®</sup>) problemlos möglich. Es wäre aber ein großes Maß an Realitätsnähe dazu gewonnen, wenn Objekte einer virtuellen Szene auch Schatten auf ihre Umgebung werfen könnten, wie es in Abbildung 4.8 dargestellt ist. Für diese Abbildung wurde der Schattenwurf mit 3D Studio Max<sup>®</sup> generiert. Für die Erzeugung der Schatten wurden zwei Lichtquellen in das Werkhallenmodell eingefügt. Eine Lichtquelle befindet sich im vorderen, die andere im hinteren Bereich des Modells. Das linke Bild zeigt die gleiche Szene wie das rechte Bild, nur ohne Schatten. Die Objekte scheinen in der Luft zu schweben. Die Szene scheint etwas unnatürlich. Ein ähnlicher Effekt tritt allerdings auch in der Realität bei diffuser Beleuchtung auf und erschwert z.B. die Orientierung im Raum. Erst durch das Hinzufügen von geworfenen Schatten der einzelnen Objekte wird die gesamte Szene natürlicher (siehe Abschnitt 2.2.1.4) und vor allem übersichtlicher. Ein Grund dafür könnte sein, dass die Größenverhältnisse mit dem Tiefenhinweis Schatten besser beurteilt werden können.

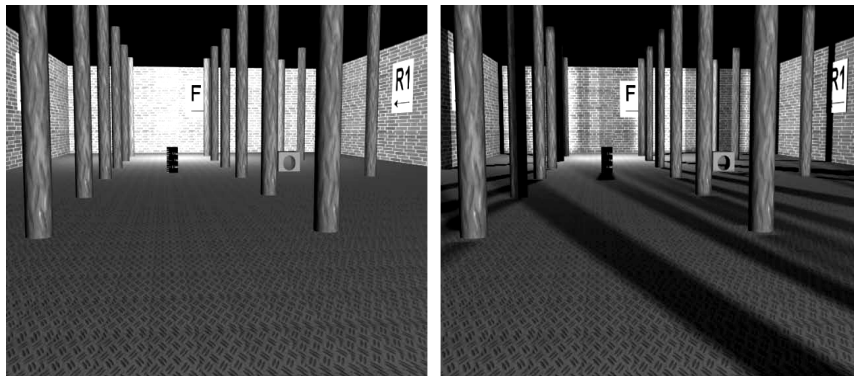


Abbildung 4.8: Die Werkhalle ohne (links) und mit (rechts) Schlagschatten

Leider kann mit der benutzten Software kein Schattenwurf von Objekten in Verbindung mit Lichtquellen in Echtzeit, also während die Simulation abläuft, erzeugt werden.

### 4.4 Die Problematik der Perspektive

Durch die Verwendung der Zentralprojektion wird die gesamte virtuelle Szene perspektivisch korrekt für das Zentrum der Projektion dargestellt, wie es bereits in Abbildung 4.7 links skizziert ist. Nach van Dam [27] ist eine perspektivische Darstellung durch einen Pyramidenstumpf beschreibbar, der den Sichtumfang (view volume) einer virtuellen Szene definiert. Solch ein Pyramidenstumpf ist durch sechs Parameter veränderbar. Zwei Parameter definieren den Abstand zur vorderen (near, hither) bzw. hinteren (far, yon)



Begrenzungsebene (clipping plane). Die restlichen vier Parameter definieren die Größe der Sichtfläche (view plane) von links oben (left, top) bis rechts unten (right, bottom). Die Möglichkeiten von WorldUp<sup>®</sup> zur perspektivischen Darstellung mit den zu beeinflussenden Parametern sind aus Abbildung 4.9 ersichtlich. Die für die Bewegung durch das Modell notwendige Koordinatenabbildung wurde durch die Kopplung eines virtuellen Objektes an den Viewpoint realisiert. Die Sensordaten des Flock of Bird, die die Position und Orientierung im Raum beinhalten, werden unter Echtzeitbedingungen an dieses Objekt bzw. den Viewpoint übertragen. Die perspektivische Realisierung wird vollständig durch das Simulationsprogramm realisiert. Die perspektivische Darstellung ist allerdings in der virtuellen Umgebung nur für die Position des Sensors/Viewpoints wirklich korrekt. Daher ist es wichtig, den Sensor nahe genug an die Augenposition des Betrachters zu bringen. Zur Vereinfachung der Handhabung wurde bei der beschriebenen Realisierung der Sensor auf einen Schutzhelm montiert. Der Abstand zwischen Augen/Blickposition und Sensor ist also relativ klein und wurde deshalb nicht als Korrekturwert in die Koordinatenabbildung eingearbeitet. Die Möglichkeiten von WorldUp<sup>®</sup> zur perspektivischen Gestaltung wurden somit vollständig ausgenutzt.

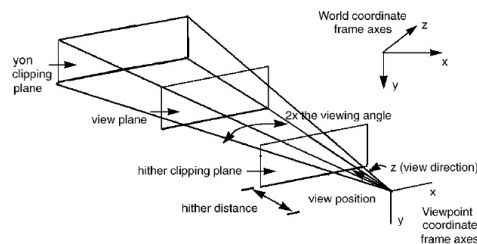


Abbildung 4.9: View Plane und Viewpoint in WorldUp<sup>®</sup> (nach [39])

#### 4.5 Bewertung der Ergebnisse

Mit der zur Verfügung stehenden Hard- und Software können im Projekt der Werkhalle der visuelle und der auditive Sinn angesprochen werden. Positiv wirkt sich die Größe der Projektionsleinwand und die zusätzliche Bodenprojektion auf den visuellen Sinn aus. Wenn man sich im Halbkreis der Projektionsleinwände befindet und auf die Projektionsleinwände blickt, wird das gesamte Blickfeld ausgefüllt. Auch der untere Teil des Blickfeldes wird durch die Bodenprojektion mit Information versorgt. Ein hoher Immersionsgrad wird durch das Zusammenwirken folgender Merkmale erreicht:

- hoher Grad an Freiheit, sich in alle Richtungen bewegen zu können;
- aktive Bewegungswahrnehmung, begünstigt durch den nutzbaren Sensorraum;

- entsprechende Rückmeldungen durch die Simulation der virtuellen Umgebung;
- ein Teil der Simulation zu sein - also das Gefühl zu haben, auf dem Fußboden des Werkhallenmodells zu stehen - mit Hilfe der Bodenprojektion;
- Verhalten der Simulation bei Kollision: man muss erst in die entgegengesetzte Richtung gehen, um sich vom Objekt zu entfernen, um sich dann wie zuvor weiter zu bewegen;
- akustisches Signal bei Kollision;
- Tiefenwahrnehmung und -beurteilung durch Tiefenhinweise, hervorgerufen durch Bewegung (Bewegungsparallaxe) und zweidimensionale Bildinformationen (Überdeckung, Texturgradient, Perspektive, Schattierung, Helligkeit).

	erfüllt	teilweise erfüllt	nicht erfüllt
<b>Kontrollfaktoren</b>			
Grad der Kontrolle		X	
Unmittelbarkeit der Kontrolle	X		
Erwartung von Ereignissen	X		
Art und Weise der Kontrolle	X		
Veränderung von Objekten			X
<b>sensorische Faktoren</b>			
sensorische Modalität		X	
reichhaltige Umgebung			X
multimodale Präsentation		X	
Konsistenz der multimodalen Information		X	
Grad der Bewegungswahrnehmung	X		
aktive Suche		X	
<b>ablenkende Faktoren</b>			
Isolation des Beobachters		X	
selektive Aufmerksamkeit		X	
Schnittstellenbewußtsein	X		
<b>Realitätsfaktoren</b>			
Realismus einer Szene		X	
Konsistenz der Information		X	
Wichtigkeit der Erfahrung			X
Desorientierung und Angst			X

Tabelle 4.1: Erfüllungsgrad immersionsrelevanter Faktoren im Projekt

Daß mit dem realisierten Modell ein hoher Immersionsgrad erreicht werden konnte, macht auch Tabelle 4.1 deutlich, in der die jeweilige Erfüllung der in Abschnitt 2.4.4 erläuterten immersionsrelevanten Faktoren zusammengestellt wurde.

## **5. Schlussbetrachtungen**

In diesem Beitrag wurden die Bewegungsparallaxe, weitere bildliche Tiefenhinweise und der Begriff der Immersion auf theoretischer Basis erläutert. Dann wurde ihre Umsetzung an Hand des virtuellen Modells einer Werkhalle am Virtual Reality Labor des IPP der TUC dokumentiert. Für die Umsetzung der Bewegungsparallaxe wurde vor allem die vorhandene Bewegungssensorik ausgenutzt.

Zusätzlich wurde eine Bodenprojektion verwirklicht. Dadurch konnte der von den Betrachtern subjektiv empfundene Immersionsgrad wesentlich gesteigert und so ein weiterer Beleg für die Theorie von Gibson geliefert werden.

Die noch bestehenden Probleme des Schattenwurfs und der Perspektivenkorrektur wurden diskutiert. Ihre Lösung wird weiteren Arbeiten vorbehalten bleiben.

Systematische Benutzerexperimente konnten im vorgegebenen zeitlichen Rahmen der Arbeit nicht durchgeführt werden. Subjektive Bewertungen bei Gruppenbesuchen ergaben aber, dass der gewählte Lösungsansatz bezüglich der skalierten Bewegung, der verwendeten und umgesetzten Tiefenhinweise, des vergrößerten Bewegungsraums und des Einsatzes der Bodenprojektion richtig war. Der räumliche Eindruck bei Bewegung wurde von allen Betrachtern bestätigt, auch wenn sie vorher mit den theoretischen Grundlagen der Arbeit nicht vertraut waren oder ihnen skeptisch gegenüberstanden.

Damit wurde das Ziel der Arbeit voll erreicht. Es konnte gezeigt werden, daß die Bewegungsparallaxe für die Erzeugung von Tiefenwahrnehmung völlig ausreichend ist. Somit ist - entgegen der weit verbreiteten Meinung - eine stereoskopische Darstellung einer virtuellen Szene nicht notwendigerweise erforderlich. Nach Ansicht der Verfasser kann dieses Ergebnis zu erheblichen Vereinfachungen und Einsparungen beim Aufbau virtueller Umgebungen führen. Außerdem entfällt die Notwendigkeit, ergonomisch fragwürdige "Stereobrillen" tragen zu müssen.

Eine Demonstration der Bewegungsparallaxe im verwendeten virtuellen Modell ist auf dem Videoserver [40] der Technischen Universität Clausthal zu finden. Unter der Rubrik "Kurzfilme zur Forschung" ist ein kleiner Ausschnitt der Demonstration im Video "Virtuelle Welten - Fantastische Realität (2004)" zu sehen.

## Literaturverzeichnis

- [1] Gorgolewski, K.: *"Demonstration der Bewegungsparallaxe"*. Diplomarbeit, Institut für Prozess- und Produktionsleittechnik, TU Clausthal (2004).
- [2] Schmidtke, H.: *Ergonomie*, Carl Hanser Verlag München Wien (1993), 3. Auflage
- [3] Frisby J.P.: *Sehen-Optische Täuschungen, Gehirnfunktionen, Bildgedächtnis*, Heinz Moos Verlag München, 1983, S. 161-170
- [4] Smets, G.J.F.: *Designing for Telepresence: the Interdependence of Movement and Visual Perception Implemented*; 5th IFAC/IFIP/IFORS/IEA Symposium on Analysis, Design and Evaluation of Man-Machine Systems; Den Haag, Niederlande, (1992).
- [5] Gibson, J.J.: *The Ecological Approach to Visual Perception*, Hillsdale, New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates (1986),
- [6] Krohn, U.: *Visualization for Retrieval of Scientific and Technical Information*. Dissertation, TU Clausthal, Clausthal-Zellerfeld, Papierflieger (1996),
- [7] Elzer, P., Krohn, U.: *Visualisierung zur Unterstützung der Suche in komplexen Datenbeständen*. Hypertext - Information Retrieval - Multimedia 1997" (GI), Dortmund (1997). S. 27-39
- [8] Elzer, P., Krohn, U.: *Visualization of Scientific in a Virtual Information Space*; HCI International '99, , München (1999). S. 122-126
- [9] Beuthel, C.: *Dreidimensionale Prozessvisualisierung zur Führung technischer Anlagen am Beispiel eines Kohlekraftwerks*. Dissertation, TU Clausthal (1997).
- [10] Beuthel, C., Elzer, P.: *Dreidimensionale Prozessvisualisierung zur Führung technischer Anlagen*. GMA Kongreß '98 - Meß- und Automatisierungstechnik (VDI/VDE), Ludwigsburg, 18-19. (1998). S. 803-810
- [11] Elzer, P., Beuthel, C.: *Three-Dimensional Representations of Process Values* HCI International '99, München (1999). S. 1296-1300
- [12] Rosendahl: *Inbetriebnahme und Adaption eines 3D-Tracking Systems für die Prozessbeobachtung und Bedienung*. Studienarbeit, TU Clausthal, IPP (1997).
- [13] Elzer, P., Beuthel, C.: *New Techniques in Maintenance and Training in Power Plants*. International Power Generation Conference and Exposition and The International Conference on Power Engineering. San Francisco (1999).
- [14] Waßhausen, D.: *Reaktivierung eines vorhandenen Tracking-Systems und dessen Verwendung für den Aufbau von weiteren Telepräsenz- und VR-Prototypen*. Studienarbeit, TU Clausthal, IPP (2004).
- [15] Friz, H.: *Design of an Augmented Reality User Interface for an Internet based Telerobot using Multiple Monoscopic Views*. Diplomarbeit, TU Clausthal, (1998).
- [16] Friz, H., Elzer, P., Dalton, B., Taylor, K.: *Augmented Reality in Internet Telerobotics Using Multiple Monoscopic Views*. Proc. of IEEE Int. Conf. on Systems, Man and Cybernetics. San Diego (1998). S. 354-359

- [17] Friz, H., Behnke, R., Elzer, P.: *Fernsteuerung eines Handhabungsautomaten über Internet*. Holleczeck (Hrsg.): PEARL '98: Workshop über Realzeitsysteme. Fachtagung der GI-Fachgruppe 4.4.2 Echtzeitprogrammierung PEARL, Echtzeitsysteme im Netz. Springer Verlag, Boppard (1998). S. 32-41
- [18] Elzer, P.; Sauermann, K.-H.: *Das Clausthale Labor für "Plant Design and Virtual Manufacturing"* P. HOLLECZEK (Hrsg.): PEARL 2001: Workshop über Realzeitsysteme, Fachtagung der GI-Fachgruppe 4.4.2 Echtzeitprogrammierung PEARL, Springer Verlag, Boppard/Rhein 22.-23.11.2001, S. 11-18
- [19] Oliver Grau, *Virtuelle Kunst in Geschichte und Gegenwart*, Visuelle Strategien, Dietrich Reimer Verlag 2002,
- [20] Johannsen, G., *Mensch-Maschine-Systeme*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York (1993)
- [21] Charwat H.J.: *Lexikon der Mensch-Maschine-Kommunikation*.; R. Oldenbourg Verlag München Wien; 2. Auflage 1994, S. 397,398
- [22] International Community for Auditory Display; [www.icad.org](http://www.icad.org) 12/2004
- [23] Regan, D.: *Depth from Motion and Motion-in-Depth*, Vision and Visual Dysfunction. Vol. 9 Binocular Vision, (1991) S. 137-169.
- [24] Faubert, J.: *Motion parallax, stereoscopy, and the perception of depth*. Practical and theoretical issues, In Threedimensional video and display: devices and systems, Bahram Javidi, Fumio Okano (Editors). Proceedings of SPIE Vol. CR76 (2001), 168-191.
- [25] Young Girl-Old Woman Illusion, MathWorld, Wolfram Research, URL: <http://mathworld.wolfram.com/YoungGirl-OldWomanIllusion.html> 12/2004
- [26] Leonardo da Vinci: *Das Buch von der Malerei. Nach dem Codex Vaticanus 1270*. Geordnet von Heinrich Ludwig. In: Quellenschriften zur Kunstgeschichte und Kunsttechnik des Mittelalters und der Renaissance. Bände 16-18, Wien, 1882. Wilhelm Braumüller.
- [27] Dam, A. van, Foley, J.D., Feiner, St. K., Hughes, J.F.: *Computer Graphics*, Principles and Practice Second Edition, AddisonWesley Publishing Company (1992)
- [28] Wissenschaftlicher Rat der Dudenredaktion: Drosdowski, 21. Auflage, Mannheim Leipzig Wien Zürich (1996).
- [29] Smith, S., Marsh, T., Duke, D., Wright, P.: *Drowning in Immersion*. Department of Computer Science University of York, UK-VRSIG'98 (1989).
- [30] Robertson, G., Czerwinski, M., Dantzich, M. van.: *Immersion in Desktop Virtual Reality*. Microsoft Research, UIST'97 Banff, Alberta, Canada (1997).
- [31] Witmer, B.G., Singer, M.J.: *Measuring Presence in Virtual Environments*. A Presence Questionnaire, Presence, Volume 7, Issue 3 (1998), 225-240.
- [32] Pausch, R., Proffitt, D., Williams, G.: *Quantifying Immersion in Virtual Reality*. University of Virginia (1997).

- [33] Bangay, S., Preston, L.: *An Investigation Into Factors Influencing Immersion In Interactive Virtual Reality Environments*. Department of Computer Science, Rhodes University Grahamstown, South Africa, Ios Press: Amsterdam, Netherlands (1998).
- [34] Elzer, P. F., Sauermann, K.-H.: *Ein verteiltes Labor für Fabrikplanung und virtuelle Fertigung*. In: Automatisierungstechnik im Spannungsfeld neuer Technologien. Tagung Baden-Baden, 22./23. Mai 2001/ VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik. VDI-Berichte Nr.1608, S.485-492. VDI-Verlag, Düsseldorf (2001).
- [35] Elzer, P. F., Behnke, R., Sauermann, K.-H., Simon, A. : *Aufbau eines Europäischen Virtuellen Labors für Entwurf, Überwachung und Steuerung von technischen Prozessen*. 15. DFN-Arbeitstagung über Kooperationsnetzwerke, Düsseldorf, Juni 2001. S. 125-131
- [36] Walter, N.: *Vergleichende Untersuchungen zur Navigation in virtuellen Räumen*. Studienarbeit, TU Clausthal, IPP (2003).
- [37] Flock of Birds.Datenblatt, Ascension Technology Corporation, P.O. Box 527 Burlington, VT 05402, USA,  
URL: <http://www.ascensiontech.com/products/flockofbirds.pdf>. 12/2004
- [38] WorldUp Programmer's Guide - Release 5, Engineering Animation Inc., Mill Valley, Californien USA, 2000
- [39] WorldUp User's Guide - Release 5, Engineering Animation Inc., Mill Valley, Californien USA, 2000
- [40] Videoserver der Technischen Universität Clausthal. Wissenschaftliche Kurzfilme zur Forschung. Virtuelle Welten - Fantastische Realität (2004);  
URL: [http://video.tu-clausthal.de/kurzfilme\\_forschung/ipp/vr](http://video.tu-clausthal.de/kurzfilme_forschung/ipp/vr) 12/2004